中国生态农业学报 2016 年 5 月 第 24 卷 第 5 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, May 2016, 24(5): 637−642

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150876

土壤盐胁迫降低后甜高粱的补偿生长和盐离子分布特征*

李春宏 郭文琦 张培通** 殷剑美 韩晓勇 王 立

(江苏省农业科学院经济作物研究所 南京 210014)

摘 要 逆境补偿效应在作物中普遍存在，对作物生长发育与产量产生重要的影响。为阐明土壤盐度降低后甜高粱的补偿生长效应，本研究采用盆栽方法，将甜高粱拔节期的土壤含盐量设置 3 个梯度：5 g·kg^{-1}(高盐处理)、由 5 g·kg^{-1}降低到 2 g·kg^{-1}(盐度降低处理)、2 g·kg^{-1}(低盐对照)，测定 2 个甜高粱品种地上部器官(茎秆、叶片、叶鞘)干物质生长速率与积累，以及盐离子(Na^+、Cl^-、K^+)在不同器官的含量。结果表明：高盐处理甜高粱地上部干物质增长速率一直显著低于对照；土壤盐度降低后，各器官干物质生长速率明显升高，并超过对照，产生了超补偿效应。成熟期高盐处理株高与地上部干物质大幅下降；土壤盐度降低后'辽甜 1 号'的株高与地上部干物质较低盐对照分别下降 7.69%和 33.21%，而'中科甜 3 号'的株高和地上部干物质重与对照没有差异。高盐处理后各器官干物质中 Na^+和 Cl^-含量较对照大幅度提高，K^+含量增加幅度较小。土壤盐分降低后的 35 d，甜高粱 Na^+和 Cl^-在各器官中含量虽仍高于对照，但比高盐处理已大幅下降；茎秆与叶鞘 K^+的含量较对照有小幅提高，而叶片 K^+含量与对照无显著差异。本研究表明：甜高粱盐胁迫降低后离子毒害减轻、生长速率加快直至超过对照，耐盐甜高粱品种补偿效应尤为明显，成熟期干物质产量可与对照相当。本研究结果可为盐碱地甜高粱栽培提供理论依据。

关键词 盐胁迫 土壤盐度降低 甜高粱 补偿效应 干物质 离子含量
中图分类号: S514 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)05-0637-06

The compensation growth and salt ion distribution in sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) after salt stress reduction*

LI Chunhong, GUO Wenqi, ZHANG Peitong**, YIN Jianmei, HAN Xiaoyong, WANG Li

(Institute of Industrial Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract Adversity compensation effect is ubiquity in crops, which impacts on crop growth, development and yield. To elucidate the compensation growth of sweet sorghum following soil salt stress reduction, a pot experiment was conducted, in which 5 g·kg^{-1} (high salt), 2 g·kg^{-1} down from 5 g·kg^{-1} (salt stress reduction) and 2 g·kg^{-1} (low-salt control) of soil salt treatments were applied at the elongation stage of sweet sorghum. Then growth rate of dry matter on aboveground parts (leaf, leaf sheath and stem) and aboveground dry matter at maturity of two cultivated sweet sorghum varieties were determined. The experiment also measured salt ions (K^+, Na^+ and Cl^-) distribution in aboveground organs of sweet sorghum. The results showed that the growth rate of aboveground dry matter in high salt treatment was always significantly lower than that of control. There was clear acceleration of growth after soil salt reduction, and gradually exceeded the growth of control due to overcompensation effect. At maturity stage, both plant height and aboveground dry matter of two sorghum varieties decreased sharply in high salt treatment. They decreased by 7.69% and 33.21%, respectively, in 'Liaotian 1' in salt stress reduction treatment compared with the low-salt control, moreover, no obviously difference was found in both plant height and aboveground dry matter of 'Zhongketian 3' between salt stress reduction treatment and low-salt control. The contents of Na^+

* 江苏省农业科技自主创新资金[CX(13)3051]资助
** 通讯作者：张培通，主要从事沿海滩涂耐盐作物品种选育与栽培研究。E-mail: ptzhang1965@163.com
李春宏，主要从事甜高粱新品种选育和生产技术研究。E-mail: 2350772535@qq.com
收稿日期: 2015−08−01 接受日期: 2015−12−03

* This study was supported by the Agricultural Independent Innovation Funds of Science and Technology in Jiangsu Province [CX(13)3051].
** Corresponding author, E-mail: ptzhang1965@163.com
Received Aug. 1, 2015; accepted Dec. 3, 2015

and Cl^- in aboveground organs significantly increased, and K^+ content slightly increased under high salt stressed condition. At 35 days after soil salt reduction, the contents of Na^+ and Cl^- still higher than that of low-salt control, but decreased significantly compared to that of high salt treatment. Although K^+ content in both leaf sheath and stem in soil salt reduction treatment were higher than that of low-salt control, no difference was observed in leaf. The results suggested that ion toxicity in salt-stressed sweet sorghum alleviated after soil salt reduction, and the growth rate eventually exceed that of low-salt control due to overcompensation effect, especially, for salt-tolerance cultivar 'Zhongketian 3'. This provided the theoretical basis for sweet sorghum cultivation in saline-alkali soils.

Keywords Salt stress; Soil salt reduction; Sweet sorghum; Compensation effect; Dry matter; Ion content

中国有盐渍土面积约 3 700×10^4 hm^2，随着耕地资源愈趋缺乏，盐渍土的改良利用成为农业生产发展的重要任务[1]。受季风气候影响，我国盐渍土盐分具有季节性变化特点，夏季降雨集中使土壤季节性脱盐，春秋季降水量减少导致土壤积盐，土壤脱盐和积盐的程度也因气候不同存在较大的地区差异，对于降雨充足的地区，尤其东部滨海盐土和滩涂地区，进入雨季后土壤盐分降低明显，为作物的高产高效生产提供了重要空间[2]。

甜高粱(*Sorghum bicolor* L.)生物产量高、适应性广，特别是在耐盐碱、抗旱耐涝性方面具有一定的优势，是近年来国内外一种新型的糖料作物、能源作物和优良的饲料作物[3–4]，适宜栽培的地区包括东北、华北、西北和黄淮等地区，在干旱、半干旱、低洼、盐碱、沙地等边际性土地也可栽培[5]。在甜高粱耐盐方面，前人的研究主要集中在特定或不同盐分水平对甜高粱生长发育的影响、材料筛选及其机理方面[6–10]，缺乏针对因降雨或灌水后土壤盐分降低对甜高粱生长发育和产量形成的影响研究，而这可能对盐碱地甜高粱生长发育和产量形成起关键作用。研究表明：逆境条件下，植物生长受到抑制，但在不致死胁迫程度内，胁迫减轻后植物生长逐渐恢复，以补偿逆境胁迫所带来的不利影响[2,11]。补偿效应在植物界中普遍存在，这方面研究较多是小麦(*Triticum aestivum*)、大豆(*Glycine max*)、棉花(*Anemone vitifolia*)、花生(*Arachis hypogaea*)、豌豆(*Pisum sativum*)、糜子(*Panicum miliaceum*)、栓皮栎(*Quercus variabi*lis)等作物的旱后复水，相关研究表明干旱胁迫后复水能促进植株株高、叶片加速生长，干物质积累速率增加等生长补偿效应[12–13]。郭文琦等[2]研究表明棉花蕾期土壤盐度降低后补偿生长首先表现在叶片果枝和果节等器官的形成上，然后实现对产量的补偿。温刘君等[14]研究了 4 种牧草种子发芽耐盐补偿生长特性发现，盐胁迫下牧草种子均表现出耐盐补偿生长现象，补偿生长范围为盐浓度的 0.2%~0.8%。目前盐害的补偿效应对其他作物生长发育与产量影响、产生的机制等缺乏系统性研究。本文研究了甜高粱拔节期土壤盐度降低后补偿生长及对盐离子在不同器官分布的影响，以阐明甜高粱土壤盐度降低后的补偿生长效应，为实施盐碱地甜高粱栽培奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2014 年在江苏省农业科学院经济作物研究所防雨棚中进行，采用盆栽方法。供试土壤为黄棕壤土，2014 年供试土壤有机质含量 14.34 g·kg^{-1}，全氮含量 0.85 g·kg^{-1}，速效磷 32.78 mg·kg^{-1}，速效钾 177.94 mg·kg^{-1}，含盐量 0.35 g·kg^{-1}。试验所用盆直径 40 cm，高 40 cm，每盆装土 20 kg，土壤经风干过筛去杂后装盆，每盆土壤在初始盐分基础上，按盐土比将混合盐(NaCl 77.7%、$MgCl_2$ 7.27%、$MgSO_4$ 9.6%、$CaCl_2$ 3.3%、KCl 2.1%)混入土壤中至 0.2%左右。供试甜高粱为一般耐盐品种'辽甜 1 号'和高耐盐品种'中科甜 3 号'[15]。5 月 8 日播种，采用直播方式，拔节期每盆保留生长一致的壮苗 1 株。施基肥为三元复合肥每盆 6 g，另 7 月 10 日、8 月 2 日各施尿素每盆 1.5 g。

试验设置 3 个处理：低盐对照(CK)，土壤含盐量维持在 2 g·kg^{-1} 左右；土壤盐度降低处理(SD)，土壤基础含盐量为 2 g·kg^{-1}，进入二叶期后每隔 7 d 天加入混合盐，使土壤含盐量每次增加 1 g·kg^{-1}，通过 3 次加混合盐使土壤含盐量达到 5 g·kg^{-1} 左右，此含盐量维持 25 d 到拔节期进行土壤盐度降低处理，用灌水冲盐的方式在 1 d 内完成，使土壤含盐量降低到 2 g·kg^{-1} 左右；高盐处理(S)，土壤初始含盐量为 2 g·kg^{-1}，进入二叶期后每隔 7 d 加入混合盐使土壤含盐量增加 1 g·kg^{-1}，通过 3 次加混合盐后最终土壤含盐量达到 5 g·kg^{-1}，并维持土壤含盐量在 5 g·kg^{-1} 左右。每处理重复 120 盆，共计 360 盆。全生育期用称量法调节土壤含水量，低盐对照和高盐处理土壤相对含水量始终维持在 70%~80%，土壤盐度降低处理仅在灌水冲盐时土壤含水量增加，其他时期土壤相对

含水量均维持在 70%~80%。

1.2　试验方法

试验前以及试验处理后每 2~3 d 用盐分测定仪测定土壤含盐量，通过控水来维持试验所需土壤含盐量。土壤盐分降低后，各处理每隔 7~10 d(计 5 次)及成熟期选取长势一致的甜高粱植株 3 株[16]，重复 3 次，取地上部分，按茎秆、叶片、叶鞘分开，105 ℃杀青 30 min 后，75 ℃烘至恒重测定其干物重，并测定盐离子(K^+、Na^+、Cl^-等)含量[17]。

1.3　数据分析

采用 SPSS 15.0 统计软件进行数据分析，多重比较采用 SSR 法。参照赵伟洁等[18]的方法将土壤盐度降低后补偿分为 3 类：超补偿作物下，QT/QC>1；等量补偿，QT/QC=1；部分补偿 QT/QC<1。QT 为胁迫降低后处理指标量，QC 为对照指标量。以此对干物质生长速率和累积量的补偿效应进行判定。

2　结果与分析

2.1　土壤盐度降低对甜高粱地上部干物质生长速率的影响

拔节期后各处理植株都进入快速生长期。高盐处理下‘辽甜 1 号’与‘中科甜 3 号’的地上部干物质生长速率一直显著低于对照；土壤盐度降低处理下，两品种各器官干物质生长速率明显升高，并先后达到或超过对照水平，产生补偿或超补偿效应。‘辽甜 1 号’单株地上部叶、叶鞘、茎及总干物质生长速率分别在 45 d、35 d、45 d 和 45 d 后产生了超补偿效应，45 d 后总干物质生长速率为 3.40 g·plant^{-1}·d^{-1} 而‘辽甜 1 号’对照为 2.98 g·plant^{-1}·d^{-1}；‘中科甜 3 号’单株地上部叶、叶鞘、茎及总干物质生长速率分别在 28 d、45 d、28 d 和 28 d 后产生了超补偿效应，28 d 后总干物质生长速率为 1.84 g·plant^{-1}·d^{-1}，而‘中科甜 3 号’对照为 1.70 g·plant^{-1}·d^{-1}(图 1)。

2.2　土壤盐度降低对甜高粱株高和地上部干物质累积的影响

成熟期调查显示：高盐处理‘辽甜 1 号’、‘中科甜 3 号’株高较对照分别下降 36.54%和 35.42%，地上部干物质分别下降 57.32%和 49.77%。盐度降低处理‘辽甜 1 号’较对照下降 7.69%，地上部干物质较对照下降 13.21%；盐度降低处理下‘中科甜 3 号’的株高较对照仅下降 1.74%，地上部干物质较对照仅下降 2.98%，与对照差异不显著，产生了等量补偿效应(表 1)。

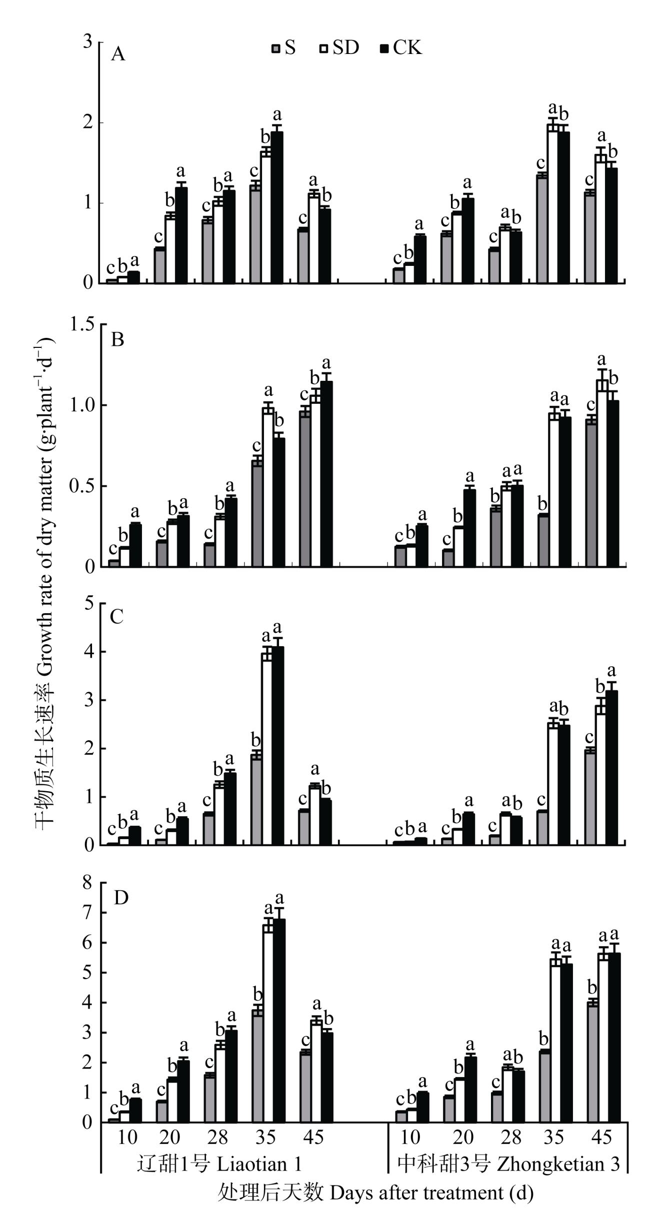


图 1　拔节期土壤不同盐度处理后甜高粱地上部叶(A)、叶鞘(B)、茎(C)干物质及总干物质(D)生长速率动态变化

Fig. 1　Dynamic changes of dry matter growth rates of leaf (A), leaf sheath (B), stem (C) and aboveground total (D) for two sweet sorghum cultivars under different treatments of soil salt content at elongation stage

CK：对照；S：高盐处理；SD：拔节期土壤盐度降低处理。下同。“处理后天数”为 SD 处理的土壤盐度降低到 CK 水平后的天数。不同小写字表示差异显著(P<0.05)。CK: control with soil salt content of 2 g·kg^{-1}; S: high soil content (5 g·kg^{-1}); SD: soil salt content was kept at 5 g·kg^{-1} for 25 days, and then decreased to 2 g·kg^{-1} at elongation stage. The same below. “Days after treatment” is days after soil salt content of SD treatment decreased to 2 g·kg^{-1}. Different small letters indicate significant difference at 0.05 level.

2.3　土壤盐度降低对甜高粱各器官离子含量的影响

土壤盐度降低处理 35 d 后调查显示(表 2)：高盐处理后甜高粱各器官干物质中 Na^+含量大幅度提高，以茎秆提高幅度最高，叶鞘次之，叶片最低，‘辽甜 1 号’与‘中科甜 3 号’茎秆、叶鞘、叶片含量分别为对

表 1 成熟期不同处理甜高粱株高及地上部干物质产量
Table 1 Plant height and aboveground dry matter yield of sweet sorghum cultivars under different treatments at maturity stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	地上部干物质产 Aboveground dry matter yield (g)
辽甜 1 号 Liaotian 1	S	198±5.43c	116±2.43c
	SD	288±5.32b	235±5.76b
	CK	312±10.43a	271±6.34a
中科甜 3 号 Zhongketian 3	S	195±5.35b	132±2.78b
	SD	297±7.23a	255±7.55a
	CK	302±5.76a	263±86.03a

照的 3.85 倍、2.82 倍、1.94 倍和 2.13 倍、2.14 倍、1.26 倍。降盐处理后，Na^+在各器官中含量较高盐处理大幅度降低，‘辽甜 1 号’与‘中科甜 3’号茎秆 Na^+含量分别是对照的 2.36 倍和 1.16 倍，叶鞘 Na^+含量为 1.55 倍和 1.16 倍，而‘辽甜 1 号’叶片 Na^+含量仅为对照的 1.06 倍，‘中科甜 3 号’为对照的 0.89 倍。

高盐处理后 K^+含量在各器官中有所提高。‘辽甜 1 号’与‘中科甜 3 号’茎秆、叶鞘、叶片平均 K^+含量含量分别为对照的 1.27 倍、1.27 倍、1.07 倍和 1.08 倍、1.08 倍、1.03 倍。降盐处理后，茎秆与叶鞘的较对照仍有小幅提高，‘辽甜 1 号’与‘中科甜 3 号’茎秆、叶鞘的 K^+含量含量分别是对照的 1.23 倍、1.15 倍和 1.07 倍、1.10 倍；但叶片 K^+含量已与对照相当。

高盐处理也增加了甜高粱各器官 Cl^-的含量。‘辽甜 1 号’与‘中科甜 3 号’茎秆、叶鞘、叶片 Cl^-含量较对照分别提高了 1.79 倍、1.41 倍、1.30 倍和 1.06 倍、1.17 倍、1.20 倍。降盐处理后，Cl^-含量在各器官中显著降低，‘辽甜 1 号’与‘中科甜 3’号的茎秆 Cl^-含量分别是对照的 1.36 倍、1.03 倍，叶鞘 Cl^-含量分别为对照的 1.32 倍、1.02 倍，而‘辽甜 1 号’叶片 Cl^-含量仅为对照的 1.04 倍，‘中科甜 3 号’叶片 Cl^-含量仅为对照的 0.82 倍(表 2)。

表 2 盐胁迫降低 35 d 后不同处理甜高粱各器官干物质离子含量
Table 2 Ion content in different organs of sweet sorghum in different treatments at 35 d after salt stress reduction
$g\cdot kg^{-1}$(dry weight)

离子种类 Ion type	处理 Treatment	辽甜 1 号 Liaotian 1			中科甜 3 号 Zhongketian 3		
		茎秆 Stem	叶鞘 Sheath	叶片 Leaf	茎秆 Stem	叶鞘 Sheath	叶片 Leaf
Na^+	S	2.85±0.15a	0.62±0.03a	0.31±0.01a	4.38±0.21a	1.09±0.05a	0.34±0.02a
	SD	1.75±0.07b	0.34±0.02b	0.17±0.00b	2.39±0.11b	0.59±0.01b	0.24±0.00c
	CK	0.74±0.04c	0.22±0.01c	0.16±0.01b	2.06±0.01c	0.51±0.02c	0.27±0.01b
K^+	S	42.76±2.58a	43.02±3.02a	24.66±1.21a	39.90±1.21a	34.34±1.12a	24.77±0.89a
	SD	41.34±3.01a	38.89±1.83b	23.65±0.87ab	39.71±2.01a	35.02±0.78a	24.04±1.04a
	CK	33.63±2.10b	33.87±0.57c	22.98±0.45b	36.94±1.02b	31.70±1.12b	24.03±0.47a
Cl^-	S	7.91±0.43a	7.34±0.23a	2.78±0.02a	7.14±0.24a	6.14±0.15a	2.24±0.11a
	SD	5.99±0.00b	6.87±0.24b	2.23±0.02b	6.91±0,31a	5.33±0.23b	1.52±0.05c
	CK	4.41±0.01c	5.22±0.13c	2.14±0.04b	6.71±0.32a	5.23±0.14b	1.86±0.05b

3 讨论与结论

土壤含盐量高时作物被迫吸收盐离子并在体内积累，造成离子毒害及渗透胁迫，从而对作物的生长发育产生抑制作用[19]。本试验结果表明，土壤盐分维持在5 $g\cdot kg^{-1}$时，甜高粱生长发育受到严重抑制，产量较低。甜高粱拔节期土壤盐度降低到2 $g\cdot kg^{-1}$后，甜高粱快速生长，干物质生长速率超过对照，产生超补偿生长效应，这也与前人研究相一致[2,14]。成熟期土壤盐度降低后‘辽甜1号’的株高、地上部干物质累积产生了部分补偿效应，而耐盐品种‘中科甜3号’产生了等量补偿效应，说明甜高粱品种之间补偿生长效应有较大差异。Guo等[20]在研究棉花盐胁迫补偿效应发现，土壤盐度降低21 d后，棉花根系活力接近或者超过对照，根叶中丙二醛(细胞氧化损伤的一个重要检测指标)含量下降，过氧化氢酶活性升高，在甜高粱盐胁迫降低后，也出现类似的结果(待发表)，土壤盐度降低后生理特性大幅恢复与提高，为补偿生长提供了物质基础。

高等植物耐盐的重要机制之一是通过调节无机离子的种类、数量和比例来维持细胞内(外)微环境的稳定[17]。盐分中的Na^+极易造成单盐毒害[21]。甜高粱盐胁迫后，茎秆、叶鞘、叶片的Na^+含量升高，这一结果符合大部分植物受到盐胁迫后的变化规律，如燕麦(*Avena sativa*)、水稻(*Oryza.sativa*)、南瓜(*Cucurbita moschata*)等[19,22]。本试验中甜高粱茎秆中的Na^+离子远大于叶鞘、叶片，甜高粱茎是输导组织支撑器官和储存器官，叶是干物质生产源，其代谢活性强[23]，Na^+离子在叶中的积累少，可以减轻

对光合功能器官叶的伤害，甜高粱植株体内离子在器官间的区域化分布调控，是其对盐胁迫的适应性反应[24]。甜高粱这种耐盐的适应策略机制与羊草(*Leymus chinensis*)、小冰麦(*Triticum aestivum-Agropyron intermedium*)、棉花(*Gossypium hirsutum*)等作物在高盐胁迫茎、叶Na^+含量相当有很大的不同。说明盐胁迫对植物作用机制与植物的适应机制存在多样性[25–26]。盐分降低后Na^+含量在各器官中大幅下降，但不同器官对土壤盐度降低的响应存在差异，叶片响应更为明显，降盐处理35 d后叶片Na^+含量已与对照相当或低于对照。Na^+胁迫抑制作用的减轻会促使植株净光合速率和气孔导度升高，抗氧化酶SOD和POD活性增加，氨基酸和糖类等有机物质的利用增加[11]，这为甜高粱加快生长创造了条件。

盐胁迫下 K^+含量在甜高粱茎叶中有所增加，这与羊草(*Leymus chinensis*)[25]、燕麦(*Avena sativa*)[19]、碱蓬(*Suaeda australis*)[22]等作物表现相反。高等非盐生植物在低浓度盐分胁迫下，K^+的吸收减少，而高等盐生植物在中等盐度下，K^+的吸收并不受影响[27]。因而推测甜高粱适应盐胁迫K^+含量机理类似于高等盐生植物，在一定浓度盐度胁迫下促进了 K^+的吸收，以保持体内较低的 Na^+/K^+平衡，维持细胞的正常生理代谢。

Cl^-含量变化规律与 Na^+的趋势相一致，但叶片、叶鞘也含有较高的 Cl^-含量。Cl^-通过平衡 Na^+电荷的作用[28]，来减轻二者对甜高粱的毒害作用，可能是适应盐胁迫的一个重要原因。

综上所述，甜高粱盐胁迫降低后补偿效应明显，尤其是耐盐甜高粱品种，补偿效应表现在：离子毒害减轻、生长速率加快并超过对照，最终地上部干物质重接近低盐对照。因而在盐碱地甜高粱栽培管理过程中应选择盐胁迫下补偿效应强的品种，把握雨季来临后甜高粱快速生长和产量形成关键时期，采取合理调节措施促进甜高粱平衡生长，以提高盐碱地甜高粱产量。

参考文献 References

[1] 王佳丽, 黄贤金, 钟太洋, 等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 673–684
Wang J L, Huang X J, Zhong T Y, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 673–684

[2] 郭文琦, 张培通, 李春宏, 等. 蕾期土壤盐度降低后棉花生长发育的补偿效应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 162–168
Guo W Q, Zhang P T, Li C H, et al. Compensation effect of cotton growth and development after soil salt content reduction at bud stage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 162–168

[3] Zegada-Lizarazu W, Monti A. Are we ready to cultivate sweet sorghum as a bioenergy feedstock? A review on field management practices[J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 40: 1–12

[4] Kumari N N, Reddy Y R, Blummel M, et al. Effect of feeding differently processed sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) bagasse based complete diet on nutrient utilization and microbial N supply in growing ram lambs[J]. Small Ruminant Research, 2014, 117(1): 52–57

[5] 徐增让, 成升魁, 谢高地. 甜高粱的适生区及能源资源潜力研究[J]. 可再生能源, 2010, 28(4): 118–122
Xu Z R, Cheng S K, Xie G D. The suitable land for sweet sorghum and its potential for ethanol production in China[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(4): 118–122

[6] 王永慧, 陈建平, 张培通, 等. 滨海滩涂盐碱地甜高粱生长和地上部干物质积累特性的研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(24): 49–53
Wang Y H, Chen J P, Zhang P T, et al. Growth characteristics and over ground dry matter accumulation of sweet sorghum grown in seashore saline soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(24): 49–53

[7] Vasilakoglou I, Dhima K, Karagiannidis N, et al. Sweet sorghum productivity for biofuels under increased soil salinity and reduced irrigation[J]. Field Crops Research, 2011, 120(1): 38–46

[8] Patanè C, Cavallaro V, Cosentino S L. Germination and radicle growth in unprimed and primed seeds of sweet sorghum as affected by reduced water potential in NaCl at different temperatures[J]. Industrial Crops and Products, 2009, 30(1): 1–8

[9] 王彩娟, 李志强, 王晓琳, 等. 室外盆栽条件下盐胁迫对甜高粱光系统Ⅱ活性的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(11): 2085–2093
Wang C J, Li Z Q, Wang X L, et al. Effects of salt stress on photosystem Ⅱ activity in sweet sorghum seedlings grown in pots outdoors[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(11): 2085–2093

[10] 王秀玲, 程序, 李桂英. 甜高粱耐盐材料的筛选及芽苗期耐盐性相关分析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1239–1244
Wang X L, Cheng X, Li G Y. Screening sweet sorghum varieties of salt tolerance and correlation analysis among salt tolerance indices in sprout stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(6): 1239−1244

[11] 郭文琦, 张培通, 李春宏, 等. 蕾期土壤盐度降低后棉花叶片的生理功能恢复[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6298–6305
Guo W Q, Zhang P T, Li C H, et al. Recovery of physiological functions of cotton leaves after relief from salt stress at the bud stage[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6298–6305

[12] Álvarez S, Sánchez-Blanco M J. Changes in growth rate, root morphology and water use efficiency of potted *Callistemon citrinus* plants in response to different levels of water deficit[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 156: 54–62

[13] 王利彬, 祖伟, 董守坤, 等. 干旱程度及时期对复水后大豆生长和代谢补偿效应的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 150–156
Wang L B, Zu W, Dong S K, et al. Effects of drought stresses and times on compensation effect after re-watering in soybean[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 150–156
[14] 温刘君, 朴顺姬, 易津. 4 种小麦族牧草种子耐盐补偿生长特性研究[J]. 中国草地学报, 2009, 31(6): 30–32
Wen L J, Piao S J, Yi J. Studies on the salt tolerance compensatory growth characteristics of four triticeae accessions' seeds[J]. Chinese Journal of Grassland, 2009, 31(6): 30–32
[15] 李春宏, 张培通, 郭文琦, 等. 耐盐甜高粱新品种中科甜 3 号的选育及栽培技术[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(3): 95–96
Li C H, Zhang P T, Guo W Q, et al. Breeding and cultivation techniques of salt-tolerance sweet sorghum new variety 'Zhongketian 3'[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(3): 95–96
[16] 渠晖, 沈益新. 甜高粱用作青贮作物的潜力评价[J]. 草地学报, 2011, 19(5): 808–812
Qu H, Shen Y X. Evaluation the potential of sweet sorghum grown for silage crop[J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(5): 808–812
[17] 宁建凤, 郑青松, 邹献中, 等. 罗布麻对不同浓度盐胁迫的生理响应[J]. 植物学报, 2010, 45(6): 689–697
Ning J F, Zheng Q S, Zou X Z, et al. Physiological responses of *Apocynum venetum* to different levels of salt stress[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2010, 45(6): 689–697
[18] 赵伟洁, 李翠, 晁桂梅, 等. 复水对水分胁迫条件下糜子生长的补偿效应[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(5): 55–65
Zhao W J, Li C, Chao G M, et al. Compensation effect of rewatering on the growth of broomcorn millet under water stress[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(5): 55–65
[19] 萨如拉, 刘景辉, 刘伟, 等. 盐碱胁迫对燕麦幼苗 Na^+、K^+ 含量及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(3): 50–54
Sa R L, Liu J H, Liu W, et al. Effects of salt stress and alkali stress on the content of Na^+, K^+ and yield of oat seedlings[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2014, 23(3): 50–54
[20] Guo W Q, Zhang P T, Li C H, et al. Recovery of root growth and physiological characters in cotton after salt stress relief[J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2015, 75(1): 85–91
[21] Wakeel A. Potassium-sodium interactions in soil and plant under saline-sodic conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, 176(3): 344–354
[22] Yang C W, Shi D C, Wang D L. Comparative effects salt and alkali stresses on growth, osmotic adjustment and ionic balance of an alkali-resistant halophyte *Suaeda glauca* (Bge.)[J]. Plant Growth Regulation, 2008, 56(2): 179–190
[23] 柴玉琳. 干旱胁迫及复水对高粱水分传导特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011: 15–16
Chai Y L. Effect of water conductivity characteristic of sorghum under drought stress and re-watering[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011: 15–16
[24] Pompeiano A, Di Patrizio E, Volterrani M, et al. Growth responses and physiological traits of seashore paspalum subjected to short-term salinity stress and recovery[J]. Agricultural Water Management, 2016, 163: 57–65
[25] 李晓宇, 蔺吉祥, 李秀军, 等. 羊草苗期对盐碱胁迫的生长适应及 Na^+、K^+代谢响应[J]. 草业学报, 2013, 22(1): 201–209
Li X Y, Lin J X, Li X J, et al. Growth adaptation and Na^+ and K^+ metabolism responses of *Leymus chinensis* seedlings under salt and alkali stresses[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(1): 201–209
[26] 杨春武, 李长有, 尹红娟, 等. 小冰麦(*Triticum aestivum-Agropyron intermedium*)对盐胁迫和碱胁迫的生理响应[J]. 作物学报, 2007, 33(8): 1255–1261
Yang C W, Li C Y, Yin H J, et al. Physiological response of Xiaobingmai (*Triticum aestivum-Agropyron intermedium*) to salt-stress and alkali-stress[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(8): 1255–1261
[27] 郭洋. 不同盐生植物吸盐特征及其对土壤改良效果[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014: 20–32
Guo Y. Characteristics of salt absorption and the effect on soil improvement of different halophytes[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014: 20–32
[28] 高伟, 陆静梅, 牛陆, 等. NaCl 胁迫下不同抗性野生大豆体内 Na^+, K^+, Cl^-浓度比较分析[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2015, 47(1): 124–128
Gao W, Lu J M, Niu L, et al. The comparative analysis of Na^+, K^+, Cl^- concentrations in different resistance of wild soybean under NaCl stress[J]. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 2015, 47(1): 124–128